第27卷 第6期 腐蚀科学与防护技术 Vol.27 No.6
2015年11月 CORROSION SCIENCE AND PROTECTION TECHNOLOGY Nov. 2015

经验交流

辽宁省内输变电设备腐蚀情况调研与分析

朱义东[1] 张春艳[2] 刘 松[1] 杨延格[2] 韦德福[1] 于宝兴[2] 杜彦强[1] 张 涛[2]

1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院 沈阳 110006;
2. 中国科学院金属研究所 金属腐蚀与防护实验室 沈阳 110016

摘要:针对辽宁省内输变电设备的腐蚀问题,对辽宁境内14个地市的23座500 kV变电站和具有代表性的27座220 kV变电站进行调查,统计分析辽宁省内输变电设备主要的腐蚀形式,分析了不同设备类型、不同区域和电压等级的输变电设备的腐蚀情况以及站内杂散电流对接地网腐蚀影响的情况,并分析了发生腐蚀的原因。

关键词:输变电设备 腐蚀形式 腐蚀原因

中图分类号:TG172 **文献标识码**:A **文章编号**:1002-6495(2015)06-0613-04

1 前言

随着国家电网工程建设规模的日益扩大,输变电设备均不同程度地出现腐蚀问题,其服役寿命达不到设计要求,大部分原因源于输变电设备的防腐措施不能对输变电设备起到保护作用。由于长期运行在野外,输变电设备的构件受到各种恶劣环境的侵蚀和破坏,进而导致输变电设备的寿命大幅缩短,且安全运行受到严重威胁。金属材料的腐蚀失效是较为普遍的现象,构件的腐蚀会降低设备的可靠性,产生安全隐患,实践表明有多起变电站故障与腐蚀有关。输变电设备是电能传输的必备途径和重要载体,做好输变电设备的外防腐工作,对于保障电网的安全运行具有十分重要的意义。

2 调研结果

2.1 腐蚀调研的总体情况

对辽宁境内14个地市的野外输变电设备腐蚀情况进行调查,共涉及辽宁境内23座500 kV变电站,27座220 kV变电站。根据辽宁境内各个地区的气候特点,将省内分为5个区域。一是距离海岸线30 km以内的滨海地区,该区域的特点为输变电设备受到含盐量较高的海风的侵袭;二是以盘锦为代表的地区,该区域特点是盐碱性土壤、地势低洼多水;三是以朝阳、阜新为代表的地区,该区域的特点为气候干旱、多风沙;四是以沈阳为代表的地区,该区域的特点为温带季风性气候;五是以葫芦岛锌厂、抚顺石化等厂区为代表的地区,该区域的特点是输变电设备受到工业SO_2等酸性污染气体的严重腐蚀。

调研结果发现辽宁省境内各地输变电设备普遍不同程度地发生腐蚀。根据GB/T19292-2004《金属和合金的腐蚀》评价腐蚀程度的标准,并结合变电站金属材料腐蚀的特性及现场具体情况,把变电站的刀闸、母线、设备间导线、裸露接地线,以及设备外壳如基座、箱柜和机组等局部部位的综合腐蚀程度视为变电站的腐蚀程度,调查统计结果显示全网遭受严重腐蚀的变电站有14座,较重腐蚀的有18座,轻微腐蚀的有17座,没有腐蚀的有1座。

2.1.1 辽宁省内输变电设备的主要腐蚀形式

经过调研大量输变电设备的腐蚀情况,发现很多设备构件在较短时间内就发生较为严重的腐蚀,并且腐蚀通常在特定的位置发生,以螺栓等接触部位为主,常见的腐蚀形式主要包括缝隙腐蚀、电偶腐蚀及大气腐蚀等。

缝隙腐蚀是由于金属表面存在异物或结构上形成缝隙,当有雨水积存时发生的电化学局部腐蚀形式。根据实际经验判断,缝隙腐蚀的敏感宽度为0.02~1 mm[1]。输变电设备金属构件最易发生缝隙腐蚀的位置多为螺栓等连接承力部位。

电偶腐蚀是当两种不同材质的金属相互接触,由于金属电极电位不同,在电解液中形成腐蚀电池。电位较低的金属腐蚀速率较大,电位较高的金属受电化学保护,腐蚀速率较缓[1]。电偶腐蚀主要发生在两种不同金属或金属与非金属导体的直接接触部位,而在远离接触面的区域腐蚀程度要轻得多。例如有些变电站设备部分支柱螺栓螺杆采用镀锌钢,套在外面的螺母采用不锈钢。由于Zn的标准电极电位−0.76 V,Fe的标准电极电位−0.44 V,而不锈钢的标准电极电位为−0.1~+0.1 V,不锈钢电位最

定稿日期:2015-01-09
作者简介:朱义东,男,1982年生,硕士
通讯作者:张春艳,E-mail:chyzhang@imr.ac.cn 研究方向为金属腐蚀与防护
DOI:10.11903/1002.6495.2014.409

高在腐蚀过程中受到保护，与之接触的镀锌钢加速腐蚀；某500 kV变电站66 kV区域某设备投运不到1a，支柱螺栓螺杆便发生不同程度的电偶腐蚀。某500 kV变电站设备的铜材料的构件，连接的紧固螺栓为镀锌钢，在运行过程中受潮气影响，螺栓和螺母发生电偶腐蚀。某500 kV变电站汇控柜的底座，采用普通钢，与之相接触的汇控柜材质为不锈钢，运行过程中底座很快发生严重腐蚀。

大气环境一般分为乡村大气、城市大气、工业大气和海洋大气。影响金属结构大气腐蚀的关键因素是在金属结构表面形成水膜的时间和大气中腐蚀性物质的含量。大气中腐蚀性物质的存在加速了金属结构的腐蚀速率，在相同湿度条件下，腐蚀性物质含量越高，腐蚀速度越大。腐蚀性物质的腐蚀性与大气的湿度有关，在较高的湿度环境中腐蚀性大，如果有如氯化物等吸湿性沉积物时即使环境大气的湿度很低也易发生腐蚀[2]。

2.1.2 不同设备类型的腐蚀情况　输变电设备最易发生腐蚀的部位主要有刀闸、母线、设备间导线、裸露接地线，以及设备外壳如基座、箱柜和机组等[3]。经调研辽宁境内输变电设备腐蚀情况，统计发现这些部位均发生不同程度的腐蚀，并随着投运年限增加，设备构件腐蚀越为严重。如图1所示调查结果表明，刀闸设备遭受严重腐蚀的约占17%，较严重腐蚀的约占31%，轻微腐蚀的约占36%；母线遭受严重腐蚀的约占10%，较严重腐蚀的约占16%，轻微腐蚀的约占10%；设备间导线遭受严重腐蚀的约占9%，较严重腐蚀的约占10%，轻微腐蚀的约占24%；裸露接地线严重腐蚀的约占8%，较严重腐蚀的约占5%，轻微腐蚀的约占21%；对于设备外壳严重腐蚀的约占23%，较严重腐蚀的约占13%，轻微腐蚀12%。

2.1.3 不同地域腐蚀情况　将调查区域根据大气环境特点分为滨海区域、盐碱性土壤地势低洼多水区域、气候干旱多风沙区域、温带季风性气候区域、工业气体污染区域等5个自然区域，并进行统计分析。结果显示区域环境因素也是导致变电站设备腐蚀的主要原因之一[4]。不同地区大气环境中所含的H_2O、O_2和包括雨水中的杂质、烟尘、表面沉积物等腐蚀性介质的联合作用，以及湿度、日照、降雨、风向、风速等对材料的腐蚀影响程度存在差异。调研发现滨海区域和工业气体污染区域如沈阳、鞍山、辽阳、本溪、抚顺等区域的输变电设备易发生严重腐蚀；朝阳、阜新等气候干旱多风沙区域降水量少，比较干燥，设备腐蚀相对轻微；盐碱性土壤地势低洼多水区域，区域环境因素主要加剧接地网腐蚀；

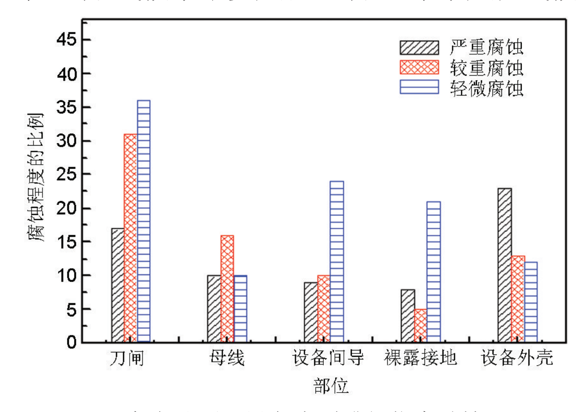


图1 变电站不同设备类型或部位腐蚀情况

2.1.4 不同电压等级设备腐蚀情况　输变电设备的腐蚀与电压等级并无明显的直接关系，发生腐蚀的原因与大气环境和电气设施有关。对50座变电站的调查统计结果如表1所示，不同电压等级的变电站设备局部均遭受不同程度的腐蚀。

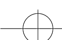
2.2 杂散电流对接地网的腐蚀情况

变电站接地网的腐蚀不仅与接地网所处的土壤特性相关，同时还与变电站现场环境和相关电气设备的运行状况密切相关，与其他埋地管道相比，变电站内还存在杂散电流和泄漏电流，必然对接地网材料的耐蚀性产生影响[5,6]。杂散电流是电力设备产生的，属于设计或规定的回路以外流动的电流，经由金属导体进入电解质、土壤、水中的电流。杂散电流可分为交流杂散电流和直流杂散电流，交流电引起的腐蚀要比直流电干扰的强度小得多。因此在杂散电流的测试过程中，主要监测直流杂散电流[7-9]。

对辽宁省境内23座500 kV变电站和具有代表性的27座220 kV变电站内直流杂散电流进行了测试。根据SY/T0017-2006《埋地钢质管道直流排流保护技术标准》，采用土壤电位梯度的测定方法测试站内23个500 kV区域、50个220 kV区域及50个66 kV区域不同地点的土壤电位梯度并判定直流杂散电流的干扰强度。土壤电位梯度大于0.5 mV/m，站内杂

表1 不同电压等级设备腐蚀情况

电压等级	数量 / 座	占该等级变电站总数的比例	局部腐蚀情况
500 kV	7	30%	严重腐蚀
	7	30%	较重腐蚀
	8	35%	轻微腐蚀
	1	4%	没有腐蚀
220 kV	7	26%	严重腐蚀
	11	41%	较重腐蚀
	9	33%	轻微腐蚀



散电流对接地网的腐蚀影响较强，土壤电位梯度处于0.5~5 mV/m，杂散电流对接地网的腐蚀影响处于中级，土壤电位梯度小于0.5 mV/m，杂散电流对接地网的腐蚀影响较小。表2为根据本标准统计的最高电压等级为500 kV变电站内和最高电压等级为220 kV变电站内不同区域杂散电流强弱程度的测试结果，表明站内直流杂散电流对接地网存在干扰，干扰程度大多处于中级。

2.3 所采用防腐蚀措施及其有效性

2.3.1 镀锌层防腐蚀情况 通过对辽宁省内大量新建、扩建变电站设备腐蚀情况调研发现变电站大部分碳钢构件采用热镀锌防腐；其中接槽钢、地扁钢、螺栓、抱箍这几类金属构件防腐镀锌层常因为质量问题发生腐蚀。主要原因是镀锌层厚度不够，镀层瑕疵或在运输、安装过程中造成的局部镀锌层破坏，使原本包覆在碳钢外面起电化学保护的镀锌层过早失效，露出下面的碳钢基体而加速腐蚀。对槽钢、抱箍等承力构件，腐蚀将降低材料的力学强度，产生安全隐患。对于接地扁钢等导流构件，腐蚀将造成有效截面积减小，接地导通电阻下降；通常镀锌层的防腐寿命与锌层厚度呈较好的线性关系，若镀锌层厚度远不能满足要求，碳钢基体也将提前腐蚀失效；例如调研过程中发现很多镀锌层构件大部分位置厚度达不到要求，有些厚度仅为标准的一半；此外，运输、安装过程中造成的局部镀锌层破坏，如果未及时进行修补，将加剧铁基体局部腐蚀。根据调研统计发现辽宁省内输变电设备投运两年后热镀锌构件均会发生不同程度腐蚀。

2.3.2 有机涂层防腐蚀情况 变电站中有部分碳钢构件由于尺寸较大、难于进行热镀锌防腐而采用表面喷涂或刷涂有机涂层的方法进行防腐蚀，例如变电站设备中的变压器、设备构架、箱体和外壳等。采用有机涂层防腐主要是依靠物理屏蔽作用隔绝外界腐蚀介质与基体铁的接触；调研发现有些构件采用有机涂层防腐，防腐涂层的底漆、中间漆和面漆匹配不合理或缺失。部分构件由于前处理不当导致防腐涂层局部位置破损，将形成孔隙积水吸潮，或

表2站内不同电压等级区域土壤电位梯度强度分布

电压等级	不同区域	中	弱
500 kV	500 kV	65%	35%
	220 kV	51%	39%
	66 kV	70%	30%
220 kV	220 kV	48%	52%
	66 kV	63%	37%

发生膜下腐蚀，进而加快Fe的腐蚀速度并以缺陷为中心扩展。

2.3.3 高耐蚀等级材料的腐蚀情况 变电站中某些装有电子元器件、精密仪表的室外机构箱、操作箱、端子箱、部分紧固螺栓等采用高耐蚀防腐蚀材料不锈钢。但是对于系统性防腐蚀来说，由于这种高耐蚀等级材料的使用，加剧了与之相接触的异种金属材料发生腐蚀。调查统计发现螺栓和箱体的门轴处常发生腐蚀。这实质上是一种缝隙腐蚀，由于腐蚀产物的形成逐渐填充在缝隙内，虽然未产生生锈，但会影响构架运转。

3 原因分析

经调研辽宁省内输变电设备大气腐蚀情况，统计发现变电站设备腐蚀较为突出，有些地区和站点较严重，导致发生腐蚀的原因十分复杂，但就地面上设备而言，大部分是由于大气环境所致。从大气中腐蚀性介质来源角度，主要有化石燃料燃烧引起的污染，造纸、制革、养殖、垃圾渗液等污染水源生化反应导致的大气污染，城市和农村废水排放生化反应引起的污染，水泥、钢铁冶炼企业配料、矿物筛选、装卸储运过程中引起的粉尘污染，塑料等加工企业生产过程中引起的污染，化工、化肥生产企业生产过程中废气泄漏引起的污染，城市和农村人口密集区人们生活所燃烧的燃料引起的污染，汽车运输过程中扬起的粉尘和尾气排放带来的污染等[1]。

3.1 大气环境是造成材料腐蚀的主要原因

变电站金属材料长期暴露在大气环境中，其受大气中所含的水分、O_2和腐蚀性介质如雨水中的杂质、烟尘、表面沉积物等的联合作用而引起了材料的破坏和设备的损坏。经过调研腐蚀较严重的变电站发现，所有遭受腐蚀损坏威胁的变电站周边的大气环境都具有一定的特点，如遭受海风和滨海盐雾的侵袭、不同程度地遭受工业污染和破坏等。实际监测结果表明滨海区域盐雾含盐量复杂，有害离子众多，盐雾主要由悬浮在大气中的液体状富Na^+、Cl^-、SO_4^{2-}及Mg^{2+}等组成，对输变电设备危害极大[10]。同时在遭受大气腐蚀的变电站的大气环境中都检测到了SO_2，NO_x，H_2S以及NH_3等污染气体，这类气体导致输变电设备常用材料腐蚀加剧。因此大气环境是造成变电站材料腐蚀的主要原因。

3.2 地理位置和气候条件促进设备腐蚀加剧

经调研辽宁省内输变电设备腐蚀情况还发现区域环境因素在一定程度上也影响了变电站设备的腐蚀，包括地区气候差异和地形地貌等。特别是当变电站所处的大气相对湿度较大，设备表面湿润时间

较长时腐蚀速率就会越大。相关研究表明气温、降雨 (酸雨)、日照、风向风速、降尘等条件均对变电站金属材料腐蚀会产生重要影响[4]。例如，大连由于海风盐雾侵袭腐蚀情况，变电站设备腐蚀较快，工业污染区域由于大气环境气体污染，变电站设备遭受较为严重的腐蚀。

3.3 施工工艺和选材对设备腐蚀程度的影响

经过调研发现部分设备构件的存在防腐涂层厚度偏薄、附着力差、施工过程中金属表面的前处理未被重视等问题。进行涂层防腐前处理时，若钢材表面清理程度达不到标准，将导致输变电设备出现各种腐蚀问题。例如调研发现有的构件发生严重的腐蚀并产生了一定厚度的腐蚀产物层，涂层防腐施工时，如果在未清理干净的构件表面上制备新的防腐涂层将导致涂层附着力差，短时间内涂层还会再次脱落，不能起到长期的防腐效果。

4 结论与建议

(l) 输变电设备大气腐蚀情况随投运年限的增加而日益严重，气候环境，材料选择以及加工和防护工艺均是导致设备金属材料发生腐蚀损坏的重要原因。

(2) 丰富和完善防腐蚀施工工艺以及质量验收规范；建议变电站从建站起就做好设备腐蚀信息、设备材料、防腐方法的记录、专门的分类管理和整理，以便为设备腐蚀防护、设备损坏预测、状态检修及防腐蚀修补提供参考。

(3) 变电站选址应远离腐蚀性气体的释放源和潮湿地区，如化工厂和污水河等；变电站在建站设计前应对拟建站地址的大气环境进行评价。

(4) 辽宁省内变电站内的杂散电流对接地网腐蚀的干扰程度较强，在个别区域应该采取排流防护措施。同时应密切关注由杂散电流产生的腐蚀问题，加强变电站内电气设备接地设计和安装的检查，加强电气设备的运行状况的检查，防止由于设计和运行状况不良导致的杂散电流腐蚀问题。

参考文献

[1] 陈军君, 李明, 王军等. 变电站金属构件的常见腐蚀形式及解决措施 [J]. 内蒙古电力技术, 2013, 31 (1): 7

[2] 原徐杰, 张俊喜, 张世明等. 镀锌层破损输电杆塔用镀锌钢在干湿交替作用下的腐蚀行为 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(5): 395

[3] 王平, 孙心利, 马东伟等. 输变电设备大气腐蚀情况调查与分析 [J]. 腐独科学与防护技术, 2012, 24(6): 525

[4] 孙成, 吴维, 黄春晓. 辽宁城市污染大气腐蚀调查研究 [J]. 全面腐蚀控制, 1994, 14(3): 1

[5] 吕旺燕, 刘世念, 苏伟等. 变电站接地网腐蚀与防护技术的研究进展 [J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(12): 26

[6] 郑敏聪, 陈自年, 李建华. 大型变电站接地装置腐蚀规律及防腐 [J]. 东北电力, 2009, 37(9): 1463

[7] 吴向东. 500 kV 输电线路接地网腐蚀分析及防护措施 [J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(12): 545

[8] 李建华, 郑敏聪, 聂新辉. 变电站内杂散电流对接地网腐蚀的影响 [J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(9): 804

[9] 郑敏聪. 杂散电流对变电站接地网材料耐蚀性的影响 [J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(4): 294

[10] 马东伟, 王平, 任汉涛. 滨海输变电线路铁塔腐蚀与防护技术探讨 [J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(11): 37

